

将来気候シミュレーションデータを利用した太陽エネルギー資源量の評価

Resource assessment of solar energy using future climate simulation data

渡邊武志*

1. はじめに

太陽光や太陽熱などの太陽エネルギーを含む再生可能エネルギーの利用が進むにつれ、気象・気候分野とエネルギー分野のつながりが強くなっている。例えば、地上に設置された太陽光発電システムは、地上で得られる太陽放射エネルギーを電力エネルギーへ変換するシステムであるため、地上で得られる日射量（以下、地上日射量と呼ぶ。）に強く影響を受ける。このため、地上日射量だけでなく、地上日射量に影響を与える雲や大気中のエアロゾル、水蒸気などに関係する大気現象への理解が重要となる。再生可能エネルギーの発達に合わせて、気象・気候分野とエネルギー分野の接点や両分野の重なる領域を対象とした「エネルギー気象・気候学」が発達している¹⁾。エネルギー気象・気候学には、気象・気候学における知識や技術を基礎としたエネルギー分野で必要とされる知見の提供や問題の解決への貢献が求められている。

本稿での題目にある太陽エネルギー資源量の評価はエネルギー気象・気候学が貢献できる主要な研究テーマの1つである。地上日射量の気象、および気候特性によって太陽エネルギー資源の時間的および空間的な偏在性が生じる。エネルギー気象・気候学においてはそのような偏在する太陽エネルギー資源量をどのようにして評価するかが研究の関心事となる。また、評価の対象とする期間によっても研究の方針が変わる。

本稿では将来の太陽エネルギー資源量の評価についての理解を深めることが狙いである。本稿で扱う太陽エネルギー資源量は、数十年の期間での平均された量である。以下の内容では、まず、第2章において太陽エネルギー分野での気候に関する情報についての基礎的な説明を行う。次に、第3章では太陽

エネルギー資源量の評価についての説明を行い、そして、第4章では、将来の太陽エネルギー資源量の評価に関する研究を紹介し、具体的な将来の太陽エネルギー資源量の評価方法について説明する。

本稿では気象に関する情報の利用は気象サービスと呼び、他方、気候に関する情報の利用は気候サービスと呼ぶ。

2. 気候サービス

本特集の趣旨にもあるように日本においては太陽エネルギー分野での将来気候データの利用は十分には進んでいないように考えられている。他方、太陽エネルギー分野においてはすでに気象データは広く利用されている²⁾。このような気象サービスに対して気候サービスの利用が進んでいない状況は、日本においてだけではなく他の国においても見られる状況である³⁾。しかしながら、将来の太陽エネルギー資源の利用についてはすでに様々な観点から研究が行われている。例えば、日本太陽エネルギー学会においては100%再生可能エネルギー部会が設立されており、活発な研究活動が行われている。

本章においては、将来気候シミュレーションデータの利用が進んでいない現状を踏まえて、まずは、気候サービスについて基礎的な理解を深めたいと思う。以下では、本稿の本題からは多少逸れる部分もあるが、エネルギー分野における気候サービスについて、気象サービスと対比をしながら説明する。World Meteorological Organization (WMO) が出版した「Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition」⁴⁾ においてエネルギー分野における気象、および気候サービスについて体系的に整理されており、以下の説明は

* 国立環境研究所気候変動適応センター 特別研究員

この文献を参考とした。

気象サービスおよび気候サービスは、気象や気候に関する情報と知見を提供する。そして、それらの活動を通じて気象や気候の変化や変動による影響の緩和と適応に関する意思決定を支援することが狙いであるとされている。図1はエネルギー分野での気象サービスと気候サービスで提供される情報の区分を示している。気象サービスと気候サービスの提供する情報の主な違いは、気象サービスは数日までの比較的短い時間スケールでの実際に生じる気象現象を対象としている。他方、気候サービスで提供される情報は過去または将来における数十年の期間の統計的な気象の状態（以下、気候状態と呼ぶ。）を対象としていることである。それぞれのサービスで利用される情報は表1のようにまとめられる。本稿では触れないが、気象から将来気候の間には1週間から10年程度までの時間スケール区分があり、それぞれに対応したサービスが提供されている。

気象サービスと気候サービスともに予測情報を提供するが、気象サービスでの予測はForecastであり、気候サービスではProjectionと表現される。この違いは、Forecastでは将来の対象時刻、場所での実際に起こる気象状態を予測対象とするが、他方でProjectionでは与えられた前提（シナリオ）に沿って予測期間中に気候状態がどのように推移するか（見通し）を予測する。

気候サービスに比べて気候サービスの利用が進んでいない理由の一つは、現状では将来気候情報の信頼性が十分でないことが挙げられている。また、エネルギー分野の発達が急であり、気候サービスへの要求の把握が困難になっていることも原因の一つであると考えられている。

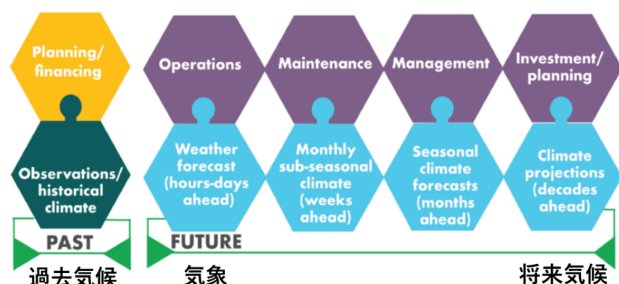


図1 エネルギー分野における気象・気候データの区分。Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition⁴⁾の図1.6に筆者が一部加筆した。

3. 太陽エネルギー資源量の評価

3.1. 概 説

太陽エネルギー資源量の評価の目的は、ある時期に、ある場所で、どの程度太陽エネルギーが得られるかを定量的に示すことである⁵⁾。一般的には、太陽エネルギー資源量の評価には連続した30年以上のデータの利用が必要とされる。この期間は、気象変動や数年規模の気候変動の影響を除外するために必要とされている。この30年間の平均値は平年値や気候値と呼ばれる。

多くの場合、地上日射量データが利用されるが太陽光発電量データなどが利用される場合もある。現在の太陽エネルギー資源量を知るためには、過去30年のデータを用いて資源量の推定をする。これは、過去30年間の気候状態が現在まで変化しないという前提をしていることになる。また同様に、将来における太陽エネルギー資源量の推定に過去データを利用する際には、気候状態が将来においても変化しないと前提して、将来の時点へ外挿することに該当する。このような前提は、気候状態が定常である場合には妥当である。しかしながら、将来には地球温暖化による気候の変化が起きると考えられており、現在においてもすでに気象・気候に対する地球温暖化の影響が表れていると考えられている⁶⁾。このような状況では、将来における太陽エネルギー資源量を過去のデータから単純に外挿することで推定することは妥当ではない場合がある。このため、数値シミュレーションにより得られた将来予測データを用いる必要が生じている。

3.2. 太陽エネルギー資源量評価の手順

太陽エネルギー資源量評価の手順は主に3つの手順からなる。対象とする期間に関わらず手順は同一である。

(1) データの収集

太陽エネルギー資源量の推定に必要なデータを収集する。利用されるデータには大きく次の3つの種

表1 気象・気候サービスで利用されるデータ

サービス	利用されるデータ
過去気候	地上観測、衛星観測、 大気再解析データ
気象	数値気象予測データ、衛星観測、 地上観測、全天カメラ画像
将来気候	数値気候シミュレーションデータ

類がある。

- 1 地上観測データ
- 2 衛星観測データプロダクト
- 3 数値気象及び気候モデルを用いた数値シミュレーションによって生成されたデータプロダクト、および大気再解析データプロダクト

それぞれのデータは異なった特徴を持っているので、利用目的に応じてデータを選定することになる。前節で述べたように、将来の気候変化の影響を考慮に入れる場合には、数値気候モデルを用いたシミュレーションデータを用いることが一般的である。

(2) データの品質管理、前処理

資源量の推定にデータに含まれる欠損値や不連続点の検出、データの精度評価を行い、データの利用の可否を判断する。必要であれば、欠損値の補間や不連続点の解消を行う。また、データの精度改善が必要な場合は補正手法を用いる。また、入手したデータが所望の解像度ではないときには高解像度化の手法を用いることで、高解像度のデータを得ることができる。

(3) 太陽エネルギー資源量の推定

得られたデータを使用して資源量の特徴を表す統計量等を計算する。データの平均からは太陽エネルギー資源量の平年値が得られる。また、太陽エネルギーの変動性を表す統計量、例えば、平均値に対する標準偏差や分位点値を用いて定量評価できる⁷⁾。月ごとに平年値を評価することで季節に依存する太陽エネルギーの変化、すなわち季節性を知ることができる。また、年ごとに評価した時系列データから年々変動を知ることができる⁸⁾。統計期間の気候状態において起こりうる極端現象を統計分布の極値等から推定することができる^{9, 10)}。

4. 将来の太陽エネルギー資源量の評価

実際に将来気候シミュレーションデータを用いて将来の太陽エネルギー資源量の評価を行った研究について紹介する。紹介する研究は、筆者が2023年度日本太陽エネルギー学会研究発表会で講演を行ったものである¹¹⁾。

解析に用いた気候シナリオシミュレーションデータは、第6次結合モデル相互比較プロジェクト(The sixth phase of Climate Model Intercomparison Project; CMIP6)内の実験の1つである高解像度モデル比較実験(HighResMIP)¹²⁾において作成されたデータセットである。HighResMIPは数値気候モデルの高解像度化による気候現象の再現性への影響を

評価することを目的としている。このため比較的高解像度のシミュレーションデータが公開されている。HighResMIPには、異なった数値気候モデルを用いた気候シミュレーションデータが公開されており、本研究の目的に適した3つの数値気候モデル、GFDL¹³⁾、HadGEM3¹⁴⁾、およびNICAM¹⁵⁾を用いて生成されたシミュレーションデータを選択した。それぞれのデータの解像度は表2にまとめた。データの期間は1950年から2050年である。1950年から2014年までが過去シミュレーション、2015年以降が将来シミュレーションである。3つのシミュレーションでは同一の将来シナリオSSP5-RCP8.5が採用されている。SSP5-RCP8.5は化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない高位参照シナリオである。このため、異なった数値気候モデル間のシミュレーションにおける違いは主に数値モデルの気候現象の表現性の差により生じていると考えられる。

データの選択において2つの条件を考慮した。

- (1) 地表面における全天日射量、直達日射量、散乱日射量のいずれか2つが得られる。これは、太陽光発電量を計算する際に直達、散乱日射量が必要となるためである。
- (2) 時間間隔が数時間、および空間格子点間隔が数十km程度より高解像度である。日本国内の地域ごとの日射量を解析でき、また、地上日射量の日内の変動性を評価できるためである。

太陽光発電量を用いた資源量評価を行うために、太陽光発電量を推定する数値モデルを用いた数値シミュレーションを行い、太陽光発電量データを作成した。気候シミュレーションの地上日射量データ等を入力値として用いた。太陽光発電量の推定のための数値モデルはWatanabe, et al. (2023)⁷⁾で開発されたモデルを用いた。1時間間隔の気象変数を入力し、日本国内の地域ごとの1時間間隔の発電量が出力される。全地域での発電量を積算して日本全体での発電量(Wh)とした。

表2 各将来気候シミュレーションの解像度

気候モデル	空間解像度(°)		時間間隔(hr)
	緯度	経度	
GFDL	0.50	0.65	3
HadGEM3	0.23	0.35	3
NICAM	0.28	0.28	3

事前のデータ処理として、3時間間隔のデータを1時間データへ補間を行った。誤差の修正は行っていない。

以下では、太陽エネルギー資源量評価に関する2つの結果を示す。1つ目は過去から将来の地上日射量の変化である（図2）。将来期間における地表面全日射量の平年値から過去期間におけるものを引いたもの（以下、将来変化と呼ぶ。）を示している。過去期間は1979年から2014年、将来期間は2015年から2050年で、いずれの期間も35年間である。地上日射量はClearness index (CI) で表示されている。CIは、地上日射量を大気上端日射量で規格化したものである。3つの数値気候モデルの結果を比較すると共通する点と異なる点があることが分かる。共通する点は、日本とその同緯度地域においては、地上日射量は増加する傾向にあることである。また、オホーツク海と日本の南の海洋上では減少する傾向にある。異なる点は、日本の陸上では将来変化の度合いが異なっていることである。HadGEM3では日本全域で有意な増加を示しているが、GFDLでは九州から沖縄においては有意な変化は見られない。NICAMにおいては日本の陸域のほぼ全域で有意な変化は見られない。

2つ目に示す結果は、日本全体で積算した太陽光発電量の年平均値の時系列である（図3）。図3には気候シミュレーションデータを利用して得られた結果のほかに地上観測データを用いて得られた結果も示してある。3つの気候シミュレーションにみられる共通の特徴としては2000年代付近まで太陽エネルギー資源量は減少傾向にあるという点である。それ以降の将来期間では気候モデル間の違いが見られ、GFDLとHadGEM3では過去期間に対して増加するが、NICAMでは顕著な変化はない。3つのシミュレーション間には違いはあるが、少なくとも、将来

の太陽光エネルギー資源量の減少を予測する結果はない。また、3つの気候シミュレーションの結果は観測値を用いた結果に比べて正のバイアス誤差を持っていることが分かる。

最後に、将来気候シミュレーションデータを用いる際に考慮すべき事項について述べる。

(1) データの利用可能性

CMIPからは多くの気候シミュレーションデータが公開されているが、利用目的に適したデータが得られない場合がある。紹介した研究では、データの時間及び時間解像度、そして太陽光発電シミュレーションに必要な気象変数を考慮して、3つの異なった気候モデルのシミュレーションデータを選択した。しかし、利用できるシミュレーションデータの数は解析の制限となっている。もし、より多くの気候モデルのシミュレーションデータが利用可能であれば、より統計的な信頼性の高い解析が可能となる。また、より空間解像度の細かいデータが利用可能であれば、より小さい地域の太陽エネルギー資源量の推定が可能となる。解像度が十分に細くない場合の1つの対処法として、ダウンスケーリング手法がある。もとの解像度の粗いデータに対してダウンスケーリング手法を用いることで、より高解像度のデータを得ることができる。ダウンスケーリングについては本特集の石崎氏による稿で説明されている。

(2) 誤差、気候状態の表現性

一般的には、数値気候モデルを用いた数値シミュレーションデータには誤差が含まれており、それぞれの数値気候モデルはそれぞれに固有の誤差の特徴を持っている。数値気候モデルの誤差は、数値気候モデルの気象・気候現象の表現の不完全性、モデルに与えられる情報の不確実性などに起因する。紹介

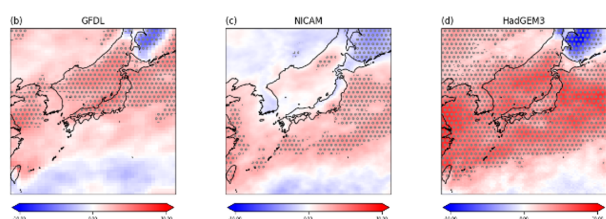


図2 それぞれの数値気候モデルの気候シミュレーションにおける地表面全日射量の将来の変化。赤色はその地点では将来期間には過去期間に比べて地上日射量の気候値が増加することを示しており、青色は減少することを示している。点が描かれている地点は、両側検定において5%有意水準で過去と将来の差が有意であることを示している。

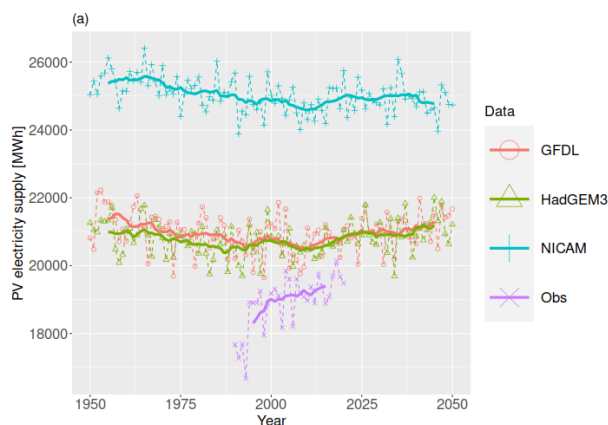


図3 数値シミュレーションから得られた太陽光発電量の年平均値の時系列。Obsは観測データを用いた結果。

した研究結果においては、気候シミュレーションの結果に明瞭な差異が認められた。また、観測データを入力値として用いた太陽光発電量シミュレーションに対して、気候シミュレーションデータを用いたものは正のバイアス誤差が見られた。紹介した研究での目的は将来の変化を対象としていたために、気候モデル間の誤差については考慮の対象としていなかった。しかし、気候シミュレーション間で将来の太陽エネルギー量の比較を行うなどの場合には、誤差の取り扱いについて検討する必要がある。このような場合の対処法の一つは、データの補正を行い、データの精度の改善をおこなうことで誤差の影響を低減することである。データ補正による精度改善は気象予測における地上日射量に対しても行われている。それらの手法が応用できる場合があると考ええる。

(3) 結果の解釈

すでに説明したように将来気候シナリオシミュレーションは、与えられたシナリオに沿った将来の気候状態の見通しを示している。この点は、気象予測データとは大きく異なっており、いつ、どこで、どのような気象、および気候現象が起こるかという情報は提供しない。将来気候シミュレーションを太陽エネルギー分野でどのように利用できるかは十分に認識されていない。今後の研究を通じて、気候サービスの有用性を具体的に示していく必要がある。

5. 最後に

太陽エネルギー分野での将来気候シミュレーションデータの利用は今後広がっていくと考えられる。現状では将来気候シミュレーションに含まれる誤差や不確実性の問題、また、データの利用可能性の問題などがあるが、研究段階での実績を重ねることで対応策や改善策の提案が行われると考えている。今後それらの問題が解消されることで、将来気候シミュレーションデータを利用した新しい気候サービスの開発につながっていくと期待している。

気候シミュレーションデータの利用についての知見と経験を積み重ねるための研究段階では気象・気候分野の専門家の支援が必要となると考える。異なった専門分野間の連携が密になることで、不要な試行錯誤が無くなり、太陽エネルギー分野での気候サービスの開発が促進されることが期待できる。このため、エネルギー気象・気候学の役割が重要になると考えている。

参考文献

- 1) 入江仁士, 小林隆, 大竹秀明, 太陽光発電, 再生可能エネルギーの気象学, 1-31 (2023), 日本気象学会, 東京.
- 2) 山口浩司, 高田望, 橋本篤, システム・事業化, 再生可能エネルギーの気象学, 153-69 (2023), 日本気象学会, 東京.
- 3) World Meteorological Organization, 2022 State of climate service Energy. 2022, Geneva, Switzerland (accessed December 20th 2024) <https://library.wmo.int/idurl/4/58116>
- 4) World Meteorological Organization, Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition. 2023, Geneva, Switzerland (accessed December 20th 2024), <https://library.wmo.int/idurl/4/66273>
- 5) T. Stoffel, Chapter 1 - Terms and definitions, Solar energy forecasting and resource assessment. 2013, 1-19, Academic Press.
- 6) 気象庁, 気象業務はいま 2024, 9-23 (2024), (accessed December 20th 2024). <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2024/HN2024.pdf>
- 7) T. Watanabe, T. Takamatsu, T. Nakajima, Evaluation of Variation in Surface Solar Irradiance and Clustering of Observation Stations in Japan. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55, 2165-2180, (2016), (<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0227.1>).
- 8) T. Watanabe, K. Oka, Y. Hijioka, Quantification of the interannual variability of the nationwide electric power supply from photovoltaic systems in Japan, Environmental Research Communications, 5, 095003, (2023), (<https://doi.org/10.1088/2515-7620/acf364>).
- 9) M. Ohba, Y. Kanno, S. Bando, Effects of meteorological and climatological factors on extremely high residual load and possible future changes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 175, 113188. (2023) (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113188>).
- 10) 渡邊武志, 岡和孝, 肱岡靖明, 連続する太陽光エネルギー低資源量日の発生頻度と同時発生範囲の評価, 日本太陽エネルギー学会誌, 47 (4), 71-76, (2021).

- 11) 渡邊武志, 岡和孝, 肱岡靖明, 高解像度将来気候シミュレーションにおいて予想される日本における地表面日射量の変化の評価, 日本太陽エネルギー学会研究発表会講演論文集 2023 (2023年11月), 261-262, 泉佐野市.
- 12) R. J. Haarsma, et al., High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9 (11), 4185-4208, (2016) (<https://doi.org/10.5194/gmd-9-4185-2016>).
- 13) M. Zhao, Simulations of Atmospheric Rivers, Their Variability, and Response to Global Warming Using GFDL's New High-Resolution General Circulation Model, *Journal of Climate*, 33 (23), 10287-10303, (2020) (<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0241.1>).
- 14) M. J. Roberts, et al., Description of the resolution hierarchy of the global coupled HadGEM3-GC3.1 model as used in CMIP6 HighResMIP experiments. *Geosci. Model Dev.*, 12 (12), 4999-5028, (2019) (<https://doi.org/10.5194/gmd-12-4999-2019>).
- 15) C. Kodama, et al., The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. *Geosci. Model Dev.*, 14 (2), 795-820, (2021) (<https://doi.org/10.5194/gmd-14-795-2021>).

著者略歴

渡邊 武志 (ワタナベ タケシ)

北海道大学大学院環境科学院環境起学専攻博士後期課程修了, 博士 (環境科学), 現在, 国立環境研究所気候変動適応センター特別研究員